

Научная статья

УДК 556:57.045

EDN: UGRJUT

Динамика концентрации биогенных элементов в водах реки Черной (Крымский полуостров) в 2015–2020 годах

М. А. Мыслина [✉], А. В. Вареник, Д. В. Тарасевич

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

[✉] *myslina@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 29.11.2023; одобрена после рецензирования 12.12.2023;
принята к публикации 15.03.2024.

Аннотация

Цель. Оценена внутри- и межгодовая динамика концентрации биогенных элементов (соединений неорганического азота, фосфатов и кремнекислоты) в водах реки Черной.

Методы и результаты. Использованы данные ежеквартального мониторинга гидрохимических характеристик вод нижнего течения реки Черной и Чернореченского водохранилища, проводимого Морским гидрофизическим институтом РАН в 2015–2020 гг. С использованием полученных данных изучено распределение концентрации соединений неорганического азота, фосфатов и кремнекислоты в водах реки Черной в исследуемый период, его сезонное и межгодовое изменение. По сравнению с периодом с 2010 по 2014 г., в 2015–2020 гг. поступление аммонийного азота увеличилось в среднем в 2,7 раза. Среднегодовое вынос неорганического азота с водами реки Черной составил 32,46 т/год в период с 2010 по 2014 г. и 27,8 т/год в 2015–2020 гг., фосфатов и кремнекислоты – 0,23 и 57,93 т/год в 2010–2014 гг., 0,18 и 62,21 т/год в 2015–2020 гг.

Выводы. Рост концентраций всех рассматриваемых биогенных элементов отмечался на станциях, расположенных вблизи сел в Байдарской долине и наиболее подверженных антропогенному воздействию, а также в районе водовыпуска агрофирмы «Севагросоюз», что может указывать на поступление минеральных удобрений в воды реки. Содержание неорганических форм биогенных элементов в водах реки Черной в современный период возросло по сравнению с периодом до 2014 г., что указывает на необходимость обсуждающегося на протяжении последнего десятилетия строительства системы канализования и очистки сточных вод предприятий и жилой застройки Байдарской долины.

Ключевые слова: река Черная, Крымский полуостров, биогенные элементы, неорганический азот, фосфаты, кремнекислота, антропогенное воздействие

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0001 «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биохимической структуры морских систем в современных условиях».

Для цитирования: Мыслина М. А., Вареник А. В., Тарасевич Д. В. Динамика концентрации биогенных элементов в водах реки Черной (Крымский полуостров) в 2015–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 438–449. EDN UGRJUT.

.

Dynamics of Nutrients Concentration in the Chernaya River Waters (Crimean Peninsula) in 2015–2020

M. A. Myslina , A. V. Varenik, D. V. Tarasevich

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 myslina@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at assessing the intra- and interannual dynamics of nutrients concentration (compounds of inorganic nitrogen, phosphorus and silicon) in the Chernaya River waters.

Methods and Results. The quarterly monitoring data on the water hydrochemical characteristics in the lower reaches of the Chernaya River and in the Chernorechenskoe reservoir obtained by Marine Hydrophysical Institute of RAS in 2015–2020 were used. The data obtained made it possible to study the distribution of inorganic nitrogen, phosphorus and silicon compound concentrations in the Chernaya River waters during the period under study as well as its seasonal and interannual changes. As compared to 2010–2014, the ammonia nitrogen levels in 2015–2020 increased on average by 2.7 times. The mean long-term inorganic nitrogen outflow with the Chernaya River waters was 32.46 t/year in 2010–2014 and 27.8 t/year in 2015–2020, phosphorus and silicon – 0.23 and 57.93 t/year in 2010–2014 and 0.18 and 62.21 t/year in 2015–2020, respectively.

Conclusions. An increase in concentrations of all the nutrients under consideration was observed at the stations located near the villages in the Baydar Valley and hence, most susceptible to the anthropogenic impact, as well as in the area of water outlet of the *Sevagrosoyuz* agricultural firm, that can testify to the inflow of mineral fertilizers to the river waters. Recently the content of nutrients inorganic forms in the Chernaya River waters has increased as compared to the period before 2014, indicating the discussed over the past decade necessity in constructing a sewerage and wastewater treatment system both for the enterprises and the residential development of the Baydar Valley.

Keywords: Chernaya River, Crimean Peninsula, nutrients, inorganic nitrogen, phosphorus, silicon, anthropogenic pressure

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on theme FNNN 2024-0001 “Fundamental studies of the processes determining the flows of matter and energy in marine environment and at its boundaries, the state and evolution of physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions”.

For citation: Myslina, M.A., Varenik, A.V. and Tarasevich, D.V., 2024. Dynamics of Nutrients Concentration in the Chernaya River Waters (Crimean Peninsula) in 2015–2020. *Physical Oceanography*, 31(3), pp. 398-408.

Введение

Река Черная является одной из основных рек Севастопольского региона, второй по полноводности на Крымском полуострове, которая, в отличие от других рек, почти никогда не пересыхает. Ее протяженность 41 км, площадь водосбора 436 км², а среднемесячный расход – 1,82–1,94 м³/с [1]. Река берет свое начало из Скельского источника, возле пос. Родниковое (Родниковское). Река Черная относится к типу рек с паводковым режимом. В нее впадает 11 притоков ¹. Река Черная – не только основной поверхностный источник водоснабжения г. Севастополя, но и единственный постоянный водоток, который разгружает свои воды в Севастопольскую бухту [2, 3].

¹ URL: https://sev.gov.ru/files/iblock/a38/gosdoklad_Sev_2015.pdf (дата обращения: 16.05.2024).
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 3 2024 439

Внутригодовое распределение стока р. Черной определяется характером питания реки и климатическими условиями. На крымских реках паводки происходят преимущественно в зимне-весенний период, с ноября – декабря по апрель, что связано с прохождением средиземноморских циклонов. Минимальный сток наблюдается в августе – сентябре вследствие уменьшения количества или полного отсутствия атмосферных осадков и истощения подземного стока [4].

Известно, что повышение уровня загрязненности стока рек может приводить к росту концентрации и аккумуляции биогенных и загрязняющих веществ в устьевой части рек, а также в прилегающей прибрежной зоне моря [5]. В целом распределение среднего содержания биогенных веществ вдоль русла рек отражает влияние природно-антропогенных факторов на формирование химического состава речных вод [6]. Средний уровень содержания неорганических соединений азота и фосфора в реках, протекающих вблизи населенных пунктов, может быть значительно выше содержания этих соединений в больших и малых реках, сток которых формируется в естественных условиях. Достаточно высокие концентрации неорганических соединений азота и фосфора наблюдаются и в реках с сильно заболоченными водосборами [6].

В работе [2] выделено несколько основных факторов, влияющих на уровень загрязнения реки Черной: загрязнение водосборной площади реки и ее притоков, высокая мутность воды во время паводков, а также загрязнение воды Чернореченского водохранилища. Авторы данной работы полагают, что источники загрязнения имеют антропогенный характер, обусловленный наличием на площади водосбора р. Черной прудов, которые используются не только как регуляторы водного стока, но и как пруды-накопители сточных вод².

Наибольшее антропогенное воздействие на р. Черную оказывает агломерация Севастополя с плотностью населения ~ 5 000 человек на 1 км² (по состоянию на 2013 г.). При этом с 2014 г. население региона увеличилось почти в два раза, что вызвало в последние пять лет увеличение доли сброса неочищенных сточных вод в общем объеме стоков на 8 % [7]. Загрязнение реки происходит в результате поступления дренажных вод с сельскохозяйственных полей и приусадебных участков, сбросов хозяйственно-бытовых сточных вод по сетям коммунального предприятия «Севгорводоканал» и неорганизованных сбросов, а также с ливневым стоком [8, 9]. В работе [10] Е. И. Овсяного с соавторами отмечено, что загрязнение вод р. Черной в среднем течении происходило в результате сброса неочищенных сточных вод из села Орлиное в р. Байдарку, а также вследствие отсутствия канализации в ближайших населенных пунктах. В районе пос. Сахарная Головка (нижнее течение реки) периодически осуществлялся сброс условно-чистых сточных вод, что приводило к загрязнению подземных водоносных горизонтов и попаданию загрязняющих веществ в реку с поверхностно-склоновым стоком [10].

² Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов: справочник / А. А. Лисовский [и др.]; под ред. А. А. Лисовского. Симферополь : КРПИ «Издательство «Крымучпедгис», 2011. 242 с.

Исходя из вышесказанного, изучение содержания биогенных элементов в водах реки Черной, его внутри- и межгодового изменения является актуальным с точки зрения оценки экологического и рекреационного потенциала как непосредственно реки, так и Севастопольской бухты. Целью данной работы является изучение внутри- и межгодовой динамики концентрации биогенных элементов в водах р. Черной.

Методы и материалы

Район отбора проб. В ходе выполнения мониторинга состояния загрязнения вод р. Черной и Чернореченского водохранилища с 2010 по 2014 г. отобрана 551 проба, а в период 2015–2020 гг. – 787 проб речной воды для определения содержания в них соединений неорганического азота, неорганического фосфора и кремнекислоты. Экспедиционные работы проводились ежеквартально и являлись частью работ государственного задания Морского гидрофизического института (МГИ) РАН (рис. 1).



Рис. 1. Расположение станций многолетнего мониторинга р. Черной: ст. 0 – зеркало водохранилища над водозабором; ст. 1 – водозабор под водохранилищем; ст. 2 – р. Байдарка, бывший ставок; ст. 3 – водопропускная труба под автомобильной дорогой в с. Озерное; ст. 4 – р. Уркуста (приток от ставка с. Передовое); ст. 5 – автомобильный мост с. Озерное – с. Передовое; ст. 6 – гидропост у Красной скалы; ст. 7 – гидропост у с. Хмельницкое; ст. 8 – автомобильный мост у с. Штурмовое; ст. 9 – ж/д мост у Инкермана; ст. 10 – автомобильный мост у Инкермана

Fig. 1. Location of long-term monitoring stations of the Chernaya River: station 0 – reservoir mirror above the water intake; station 1 – water intake under the reservoir; station 2 – Baydarka River, former pond; station 3 – culvert under the road in the Ozernoe village; station 4 – the Urkusta River (tributary from the pond in the Peredovoye village); station 5 – automobile bridge between the villages Ozernoye and Peredovoye; station 6 – gauging station at the Red Rock; station 7 – gauging station by the Khmel'nitskoe village; station 8 – automobile bridge by the Shturmovoe village; station 9 – railway bridge near Inkerman; station 10 – automobile bridge near Inkerman

Для оценки изменения степени антропогенного воздействия на динамику содержания биогенных элементов в водах р. Черной был также рассмотрен период 2010–2014 гг., т. е. до активного освоения земель в Байдарской долине.

Методы химического анализа. Концентрация суммы нитратов и нитритов определялась спектрофотометрическим методом (РД 52.10.243-92) на автоматическом проточном многоканальном анализаторе биогенных элементов *Scalar San⁺⁺* (Нидерланды). Метод основан на восстановлении нитратов до нитритов через омедненный кадмиевый редуктор. При минимальной определяемой концентрации суммы нитратов и нитритов 0,36 мкмоль/л погрешность составляет $\pm 0,20$ мкмоль/л. Содержание ионов аммония определялось модифицированным спектрофотометрическим методом Сэджи – Солорзано [11], основанным на фенолгипохлоритной реакции с образованием индофенола в диапазоне концентраций 0,1–15,0 мкмоль/л с погрешностью σ , равной ± 12 %. Концентрация фосфатов определялась спектрофотометрическим методом, основанным на образовании голубого фосфорномолибденового комплекса с диапазоном измерения концентраций 0,05–100,0 мкмоль/л, максимальная погрешность метода ± 15 % (РД 52.10.243-92). Концентрация кремнекислоты определялась спектрофотометрическим методом (РД 52.10.243-92), основанным на образовании голубого кремнемолибденового комплекса, с диапазоном определяемых концентраций 0,05–80,0 мкмоль/л. Погрешность метода составляет от 3 до 20 %.

Результаты

Основными формами азота в исследуемый период являлись аммонийный (NH_4^+) и нитратный (NO_3^-) азот. Их вклад в общее содержание соединений неорганического азота в водах р. Черной составил 9,97 и 87,51 % соответственно. Нитриты, как промежуточный элемент окисления аммония до нитратов, обнаруживались в намного более низких концентрациях, поэтому в работе рассматривается концентрация суммы нитратов и нитритов (окисленный азот, $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$). Некоторые статистические характеристики концентраций определяемых элементов представлены в табл. 1 и 2.

Содержание аммонийного азота в водах р. Черной в период 2015–2020 гг. изменялось в пределах от 0,00 до 161,58 мкмоль/л. Максимальная концентрация была определена в апреле 2018 г. у железнодорожного моста в Инкермане (ст. 9).

Концентрации суммы нитратов и нитритов изменялись в диапазоне 5,41–499,76 мкмоль/л, максимальное содержание окисленного азота было определено в апреле 2018 года также на ст. 9.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Концентрация биогенных элементов, мкмоль/л, в водах р. Черной в 2015–2020 гг.
Concentration of nutrients, $\mu\text{mol/l}$, in the Chernaya River waters in 2015–2020

Характеристика / Characteristic	NH_4^+	$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$	SiO_3^{2-}	PO_4^{3-}
C_{\min}	0,00	5,41	1,61	0,00
C_{\max}	161,58	499,76	256,85	13,12
Медиана / Median	3,14	31,32	38,75	0,10
Стандартное отклонение / Standard deviation	11,92	47,36	42,75	1,49

Диапазон изменения концентрации фосфатов (PO_4^{3-}) в водах реки составлял 0,00–13,12 мкмоль/л. Максимальное их содержание было зафиксировано в августе 2020 г. на ст. 9. При этом в сентябре 2015 г. концентрация фосфатов на этой станции также была высокой и составляла 11,34 мкмоль/л.

Максимальное содержание кремнекислоты (SiO_3^{2-}) в 2015–2020 гг. отмечалось в сентябре 2016 г. в притоке р. Уркусты (ст. 4) и в ноябре 2017 г. в районе гидропоста у Красной Скалы (ст. 6), концентрации достигали 256,85 и 201,90 мкмоль/л соответственно. В целом диапазон изменения концентрации в этот период исследования составлял 1,61–256,85 мкмоль/л.

В 2010–2014 гг. медианное содержание аммонийного азота и кремнекислоты было ниже, чем в 2015–2020 гг. (табл. 2). Диапазон изменения концентрации аммонийного азота составлял 0,00–30,46 мкмоль/л, кремнекислоты 0,99–308,15 мкмоль/л.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Концентрация биогенных элементов, мкмоль/л, в водах р. Черной
в 2010–2014 гг.**
**Concentration of nutrients, $\mu\text{mol/l}$, in the Chernaya River waters
in 2010–2014**

Характеристика / Characteristic	NH_4^+	$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$	SiO_3^{2-}	PO_4^{3-}
C_{\min}	0,00	11,17	0,99	0,00
C_{\max}	30,46	302,19	308,15	6,22
Медиана / Median	1,01	39,16	35,85	0,13
Стандартное отклонение / Standard deviation	6,20	50,34	48,63	0,95

Медианные концентрации суммы нитратов и нитритов так же, как и медианные концентрации фосфатов, в 2010–2014 гг. незначительно превышали соответствующие концентрации в 2015–2020 гг. Содержание окисленного азота изменялось от 11,17 до 302,19 мкмоль/л, фосфатов – от 0,00 до 6,22 мкмоль/л.

Сезонная изменчивость концентраций биогенных элементов

При рассмотрении сезонного распределения аммонийного азота в 2015–2020 гг. (рис. 2, а) можно отметить, что концентрации на станциях в районе Чернореченского водохранилища и вдоль всего течения р. Черной распределялись почти равномерно. Исключение составляли повышенные значения в летний период на ст. 3, 4, расположенных вблизи сел Озерное и Передовое, а также на ст. 9 в течение всего года.

Минимальные концентрации суммы нитратов и нитритов (рис. 2, б) приходились на летний период, максимальные были характерны для весенне-зимнего периода. Повышенное содержание окисленного азота определялось в зимний период в районе р. Байдарки (ст. 2) и водопропускной трубы под автомобильной дорогой в с. Озерное (ст. 3), а также всесезонно у железнодорожного моста в Инкермане (ст. 9).

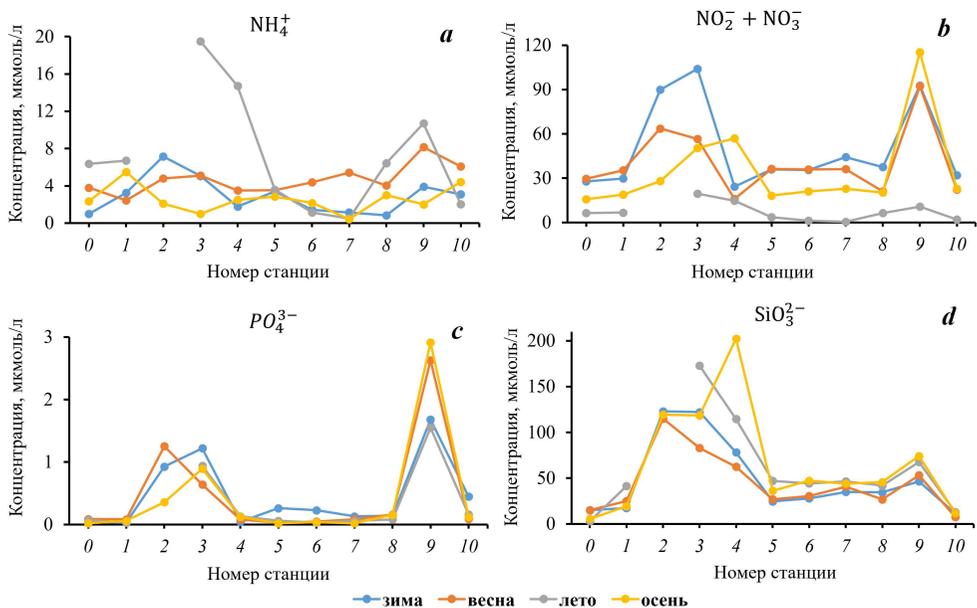


Рис. 2. Сезонное распределение биогенных элементов в воде р. Черной в 2015–2020 гг.
Fig. 2. Seasonal distribution of nutrients in the Chernaya River waters in 2015–2020

На протяжении всего исследуемого периода максимум содержания фосфатов отмечался на ст. 9 (рис. 2, с). Повышенные их концентрации определялись в течение всех сезонов в районе ст. 2, 3. Снижение содержания фосфатов по всему течению реки происходило в летний и осенний периоды.

Повышенные концентрации кремнекислоты (рис. 2, d) наблюдались на ст. 2, 3, 4, а также на ст. 9. Максимальные значения отмечались в осенний период в притоке р. Уркусты (ст. 4), в который попадают стоки из села Передовое.

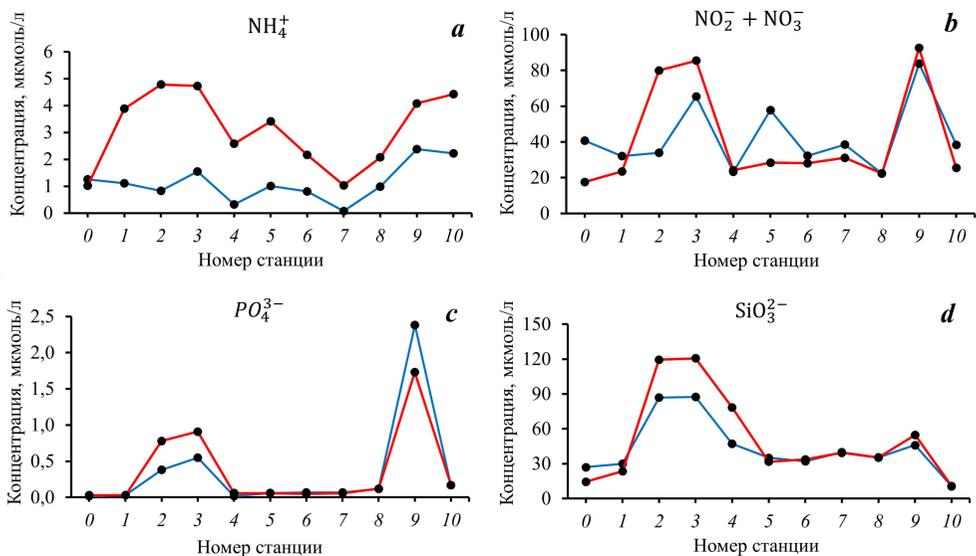
Межгодовое изменение содержания биогенных элементов.

По сравнению с периодом с 2010 по 2014 г., в 2015–2020 гг. поступление аммонийного азота увеличилось в среднем в 2,7 раза по всему течению реки (рис. 3, a). Особенно явно это увеличение проявляется на ст. 1, 2 и 3.

В ходе анализа изменения концентрации окисленного азота (рис. 3, b) также было выявлено ее увеличение в 2015–2020 гг. в районе ст. 2 и 3 и двукратное уменьшение на ст. 5, расположенной между селами Широкое и Озерное.

Ход концентрации фосфатов вдоль течения реки в 2015–2020 гг. и в 2010–2014 гг. имеет аналогичный характер (рис. 3, c): так же, как и для соединений неорганического азота, отмечается увеличение концентраций на ст. 2 и 3.

Сходный характер в оба рассматриваемых периода имеет и изменение концентрации кремнекислоты (рис. 3, d). При этом отмечается увеличение ее содержания по сравнению с более ранним периодом на ст. 2, 3 и 4.



Р и с. 3. Среднегодовое содержание биогенных элементов в водах р. Черной (синяя линия – 2010–2014 гг., красная – 2015–2020 гг.)

F i g. 3. Mean long-term nutrients content in the Chernaya River waters (blue line denotes 2010–2014, red line – 2015–2020)

Количественные оценки поступления биогенных элементов с речными водами

Согласно [12] среднегодовой сток р. Черной составляет ~ 57,7 млн м³/год. При этом выделяется два периода: многоводный (декабрь – апрель), во время которого величина стока составляет 51,2 % от годового, и маловодный (май – ноябрь). Исходя из этих значений, а также данных о медианной концентрации биогенных элементов в водах реки, нами был рассчитан вынос биогенных элементов в Севастопольскую бухту для двух рассматриваемых периодов: 2015–2020 и 2010–2014 гг. (табл. 3).

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Вынос биогенных элементов с водами р. Черной в 2010–2014 / 2015–2020 гг.
Nutrients outflow with the Chernaya River waters in 2010–2014 and 2015–2020

Вынос / Outflow	NH_4^+	$\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$	SiO_3^{2-}	PO_4^{3-}
Среднегодовой, т/год / Mean long-term, t/year	0,82 / 2,50	31,64 / 25,30	57,93 / 62,21	0,23 / 0,18
В многоводный период, т/сезон / High water period, t/season	0,36 / 1,33	17,85 / 16,01	35,86 / 29,55	0,11 / 0,12
В маловодный период, т/сезон / Low water period, t/season	0,78 / 1,14	11,41 / 9,02	13,60 / 32,18	0,12 / 0,08

Обсуждение результатов

В содержании биогенных элементов вдоль течения р. Черной наблюдались закономерные изменения, обусловленные, как было показано ранее в [13], активностью процессов потребления этих элементов растениями и минерализации органического вещества, а также их поступлением с поверхностным стоком с площади водосборного бассейна и со сточными водами.

Сезонные изменения в 2015–2020 гг.

Минимальные концентрации суммы нитратов и нитритов (рис. 2, *b*) в летний период могут объясняться их активным потреблением автотрофными бактериями. Максимальные концентрации этих биогенных элементов во время весенне-зимних паводков характерны для периода максимального поверхностно-стокового смыва, а также для меженного периода вследствие окисления автохтонных органических веществ и относительного увеличения доли сточных вод при уменьшении естественного стока [2].

Повышенные концентрации фосфатов на ст. 2 и 3 могут объясняться поступлением их в воды реки Черной в результате смыва с полей вод, содержащих удобрения. Снижение содержания фосфатов в летний и осенний периоды, вероятно, связано с переходом их в органическую форму в результате потребления их водными организмами в процессе жизнедеятельности.

Уровень содержания кремния в водах рек, по сравнению с содержанием соединений азота и фосфора, в меньшей степени определяется действием антропогенных факторов [6]. Наибольшие концентрации кремнекислоты были отмечены в период половодья, что согласуется с [3].

На увеличение содержания биогенных элементов в районе ст. 2 и 3 могут оказывать влияние сбросы сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС 5), расположенных в районе с. Озерное [14]. Эти очистные сооружения имеют биологический тип очистки вод, суть которой заключается в расщеплении микроорганизмами азотсодержащих органических соединений, в результате чего в большом количестве выделяется аммиак³. В природных условиях окисление аммиака (нитрификация) происходит с образованием солей азотистой кислоты (нитратов). Согласно [14] объем сбрасываемых сточных вод КОС 5 около 18 тыс. т/год. Средняя концентрация аммонийного азота в сточных водах составляет – 21,42 мкмоль/л, суммы нитратов и нитритов – 2157 мкмоль/л, фосфатов – 93,55 мкмоль/л.

Обращают на себя внимание постоянно повышенные концентрации всех рассматриваемых биогенных элементов в водах реки на ст. 9, фиксирующиеся каждый год во все сезоны. В районе указанной станции отбора проб расположен постоянно действующий водовыпуск, предположительно, от агрофирмы «Севагросоюз». Основным видом деятельности данной фирмы, согласно информации на сайте⁴, является выращивание овощей. В апреле и августе 2023 г. нами были отобраны пробы воды из этого водовыпуска и проанализированы на содержание биогенных элементов. Было получено, что концентрация ионов аммония превышала предельно-допустимую концентрацию (ПДК) для водных

³ Голубовская Э. К. Биологические основы очистки воды. М. : Высшая школа, 1978. 271 с.

⁴ URL: <https://spark-interfax.ru/sevastopol-balaklavski/ooo-sevagrosoyuz-inn-9202002342-ogrn-1149204043526-aea1ce5322814e16b93d772bdf926635> (дата обращения: 10.05.2024).

объектов рыбохозяйственного значения⁵ в 5,5 раза, нитритов – в 9,1 раза, нитратов – в 4,5 раза, фосфатов – в 8,7 раза, кремнекислоты – в 22 раза.

Можно предположить, что такие высокие концентрации биогенных элементов являются результатом смыва минеральных удобрений (азотных, фосфорных и т.д.) с полей агрофирмы и поступления их с грунтовыми или сточными водами. По-видимому, сток воды, содержащей столь значительные количества неорганических форм биогенных элементов, из этого водовыпуска может способствовать повышению их концентраций в водах р. Черной на ст. 9.

Помимо этого, в работе [14] отмечается, что в районе этой станции имеется точка сброса сточных вод канализационных очистных сооружений, расположенных в пос. Сахарная Головка, с объемом сбросов в реку 420 тыс. т/год. Средняя концентрация аммонийного азота в этих водах составляет – 21,42 мкмоль/л, суммы нитратов и нитритов – 2435 мкмоль/л, фосфатов – 196,75 мкмоль/л. К тому же несколько выше по течению реки находятся водоочистные сооружения с объемом сбросов 1680 тыс. т/год, в которых средняя концентрация аммонийного азота составляет 3,57 мкмоль/л, суммы нитратов и нитритов – 1143 мкмоль/л и фосфатов – 16,13 мкмоль/л. Возможно, этот источник также может являться причиной высокого содержания биогенных элементов в водах реки на данной станции.

Отметим, что станции отбора проб 9 и 10 находятся в зоне смешения речных и морских вод, т. е. относятся к маргинальному фильтру. Поэтому повышенные концентрации биогенных элементов в водах реки на этих станциях оказывают значительное влияние и на экосистему Севастопольской бухты.

Межгодовое изменение содержания биогенных элементов

Особенно явно увеличение концентрации аммонийного азота в 2015–2020 гг. по сравнению с более ранним периодом проявляется на станциях 1, 2 и 3, расположенных вблизи сел Широкое и Озерное. В этих селах достаточно развито животноводство и сельскохозяйственная деятельность, при этом отсутствуют системы канализации и очистки сточных вод.

Выявленное увеличение в 2015–2020 гг. концентрации суммы нитратов и нитритов, а также фосфатов в районе ст. 2 и 3 может быть связано с поступлением в грунтовые воды азотно-фосфорных удобрений с сельхозугодий. При этом возросшая вдвое концентрация биогенных элементов на ст. 5 (между селами Широкое и Озерное) может объясняться тем, что в этом месте происходит смешение условно чистых вод со ст. 1 (водозабор под водохранилищем) и загрязненных вод со ст. 3 и 4 (с. Озерное и приток от ставка с. Передовое).

Увеличение концентраций кремнекислоты в 2015–2020 гг. на ст. 2 и 3 может быть результатом антропогенного воздействия, а именно проведения сельскохозяйственных работ и роста жилой застройки в рядом расположенных селах. Кроме того, в окрестности ст. 3 нами отмечено активное возведение на холме группы коттеджей, не указанных на онлайн-картах. Эта деятельность приводит к поступлению силикатов в грунтовые воды, а затем и в реку. Станция 4 является менее антропогенно нагруженной, поэтому здесь увеличение

⁵ Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования : ГН 2.1.5.689–98. Введ. 1998-03-04. М. : Минздрав, 77 с.

концентрации кремнекислоты может, вероятно, объясняться выщелачиванием горных пород.

Заключение

В работе рассмотрено содержание биогенных элементов (среднее и сезонное) в водах р. Черной, а также его изменение в водах реки в два отдельных периода: с 2010 по 2014 г. (до активного освоения земель Байдарской долины) и с 2015 по 2020 г.

В рассматриваемые периоды вне зависимости от сезона наблюдались повышенные концентрации всех биогенных элементов на станциях в районе Байдарской долины и у железнодорожного моста в Инкермане. Основными источниками поступления соединений неорганического азота и фосфатов в реку в районе ст. 9 могут являться водовыпуск (предположительно, от фирмы «Севагросоюз») и сточные воды КОС, расположенных в пос. Сахарная Головка. Максимальные концентрации кремнекислоты отмечались в притоке р. Уркусты и в районе гидропоста у Красной Скалы, что может быть результатом выщелачивания горных пород и проведения земельных работ.

В ходе анализа межгодового изменения концентрации биогенных элементов было получено, что в 2015–2020 гг. их содержание по сравнению с периодом до 2014 г. увеличилось на станциях в районе Байдарской долины, при этом содержание аммонийного азота выросло по всему течению р. Черной.

Поток фосфатов с водами реки в Севастопольскую бухту в оба рассматриваемых периода был почти неизменным. Среднемноголетний вынос аммонийного азота с речными водами в 2015–2020 гг. в три раза превысил этот показатель для периода 2010–2014 г. Поток кремнекислоты с водами р. Черной в мае – ноябре в период 2015–2020 гг. превышал поток в 2010–2014 гг. почти в 2,5 раза, что может объясняться активизацией строительных работ в теплый период года.

Полученные в ходе работы данные указывают на необходимость обсуждающегося на протяжении последнего десятилетия строительства систем канализования и очистки сточных вод предприятий и жилой застройки Байдарской долины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров М. В., Витер Т. В. Пространственно–временные изменения в макрозообентосе устья реки Черной и вершины Севастопольской бухты (Юго-Западный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7, № 4. С. 92–107. EDN SVHKYE.
2. Овсяный Е. И., Орехова Н. А. Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 82–94. EDN QPANDR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-1-82-94>
3. Орехова Н. А., Медведев Е. В., Овсяный Е. И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. EDN YLLQIN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-84-91>
4. Совга Е. Е., Хмара Т. В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 31–40. EDN NNGSDX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-31-40>

5. *Скибинский Л. Э.* Значение геохимических барьерных зон в формировании эколого-гидрохимического состояния прибрежных вод Белого моря // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря : материалы IX международной конференции, 11–14 октября 2004 г., Петрозаводск. Петрозаводск : ПИН, 2005. С. 280–284.
6. *Савичев О. Г.* Реки Томской области: состояние, использование и охрана. Томск : Изд-во ТПУ, 2003. 202 с.
7. *Миньковская Р. Я.* Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Чёрного моря). Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ РАН, 2020. 364 с. <https://doi.org/10.22449/978-5-6043409-2-9>
8. *Орехова Н. А., Медведев Е. В., Овсяный Е. И.* Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. EDN YLLQIN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-84-91>
9. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152. EDN KQOLRV.
10. Сток реки Черной как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 57–65. EDN YMTPSY.
11. *Solórzano L.* Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method // Limnology and Oceanography. 1969. Vol. 14, iss. 5. P. 799–801. <https://doi.org/10.4319/lo.1969.14.5.0799>
12. *Миньковская Р. Я.* Геофизическая характеристика устьевой области реки Черной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 194–214. EDN YQYLEZ.
13. *Моисеенко О. Г., Хоружий Д. С., Медведев Е. В.* Карбонатная система вод реки Черной и зоны биогеохимического барьера река Черная – Севастопольская бухта (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 6. С. 47–60. EDN TECAZT.
14. *Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я.* Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 92–106. EDN XGZGZL. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-92-106>

Об авторах:

Мыслина Мария Андреевна, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-0054-0379**, **SPIN-код: 1309-1787**, myslina@mhi-ras.ru

Вареник Алла Валерьевна, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 3277-7914**, **ORCID ID: 0000-0001-5033-4576**, **ResearcherID: H-1880-2014**, **Scopus Author ID: 56960448000**, alla.varenik@mhi-ras.ru

Тарасевич Диана Вячеславовна, инженер–исследователь, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-4893-9685**, **SPIN-код: 7214-4237**, ledi_di2020@bk.ru